

DINAMIKA SPASIAL, KARAKTERISTIK MORFOMETRIK, DAN PROFIL METABOLIT SEKUNDER LAMUN SEBAGAI RESPONS TERHADAP LINGKUNGAN MORFOTIPE PULAU- PULAU KECIL DI MALUKU UTARA

RUSTAM EFFENDI PAEMBONAN



**PROGRAM DOKTOR ILMU KELAUTAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Dinamika Spasial, Karakteristik Morfometrik, dan Profil Metabolit Sekunder Lamun sebagai Respons terhadap Lingkungan Morfotipe Pulau-Pulau Kecil di Maluku Utara” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Agustus 2026

Rustam Effendi Paembonan
NIM C5601221006

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

RUSTAM EFFENDI PAEMBONAN. Dinamika Spasial, Karakteristik Morfometrik, dan Profil Metabolit Sekunder Lamun sebagai Respons terhadap Lingkungan Morfotipe Pulau-Pulau Kecil di Maluku Utara. Dibimbing oleh DIETRICH GEOFFREY BENGEN, I WAYAN NURJAYA, SYAMSUL BAHRI AGUS dan NYOMAN METTA N NATIH.

Ekosistem lamun merupakan ekosistem pesisir tropis yang berperan penting sebagai habitat biota, penstabil sedimen, penyerap karbon biru, penyedia area asuhan, serta penopang produktivitas perikanan pulau-pulau kecil. Keberlanjutan ekosistem ini sangat dipengaruhi oleh kondisi habitat, terutama parameter hidro-oseanografi, kualitas substrat, ketersediaan nutrisi, dan dinamika geomorfologi pulau. Di wilayah kepulauan seperti Maluku Utara, variasi morfotipe pulau (seperti : vulkanik, tektonik, dan dataran) berpotensi membentuk karakter lingkungan yang berbeda dan selanjutnya memengaruhi struktur komunitas, plastisitas morfometrik, serta respons metabolomik lamun.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis karakteristik parameter lingkungan habitat lamun pada morfotipe pulau kecil yang berbeda; (2) menganalisis keragaman spasial lamun berdasarkan variasi parameter lingkungan; (3) menganalisis karakter morfometrik *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, dan *Cymodocea rotundata* sebagai respons terhadap heterogenitas habitat; (4) menganalisis profil metabolit sekunder lamun yang mencirikan respons adaptif pada masing-masing morfotipe pulau kecil, dan (5) menyusun sintesis konseptual mengenai respons adaptif lamun terhadap lingkungan morfotipe pulau kecil sebagai dasar pengembangan indikator kualitas habitat dan strategi pengelolaan lamun.

Penelitian dilakukan di tiga pulau kecil di Maluku Utara yang mewakili morfotipe berbeda, yaitu Pulau Ternate sebagai pulau vulkanik, Pulau Mare sebagai pulau tektonik, dan Pulau Tawabi sebagai pulau dataran. Parameter yang dianalisis meliputi fisika-kimia oseanografi, kualitas substrat, fraksi sedimen, distribusi spasial lamun berbasis citra Sentinel-2A dan data lapangan, indeks komunitas lamun, karakter morfometrik *above-ground* dan *below-ground*, serta profil metabolit sekunder menggunakan LC-MS/MS. Analisis multivariat digunakan untuk mengidentifikasi penciri lingkungan, asosiasi ekologis, dan pola respons lamun antar-morfotipe.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa setiap morfotipe pulau memiliki penciri lingkungan yang berbeda. Pulau Ternate dicirikan oleh fosfat perairan dan substrat, tinggi gelombang, kedalaman distribusi lamun, serta fraksi kerikil. Pulau Mare dicirikan oleh dominasi substrat pasir dan kandungan nitrat substrat yang tinggi. Pulau Tawabi dicirikan oleh suhu, salinitas, TDS, kekeruhan, bahan organik, pH substrat, dan karakter pasang surut yang merepresentasikan lingkungan pulau dataran dangkal. Analisis kluster menunjukkan bahwa Pulau Mare dan Pulau

Tawabi memiliki kemiripan lingkungan yang lebih dekat dibandingkan Pulau Ternate.

Keragaman spasial lamun memperlihatkan pola yang berbeda antar-pulau. Pulau Ternate berasosiasi kuat dengan jumlah tegakan, persenutupan, kerapatan padat, dan dominansi. Pulau Mare berasosiasi kuat dengan kerapatan jarang, jumlah jenis, keanekaragaman, dan keseragaman yang lebih tinggi. Pulau Tawabi dicirikan oleh kerapatan sedang dan keseragaman komunitas. Pola ini menunjukkan bahwa morfotipe pulau membentuk mosaik habitat yang memfilter komposisi dan struktur komunitas lamun.

Karakter morfometrik *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, dan *Cymodocea rotundata* menunjukkan plastisitas fenotipik sebagai bentuk penyesuaian terhadap heterogenitas habitat. Variasi panjang dan lebar daun, seludang, internode, rizoma, dan akar mengindikasikan strategi adaptif yang berbeda antara pertumbuhan *above-ground* dan *below-ground*. Respons tersebut mencerminkan kemampuan lamun mempertahankan fungsi ekologis pada habitat yang memiliki dinamika hidrodinamika, substrat, dan nutrisi berbeda.

Profil metabolit sekunder menunjukkan bahwa tiga spesies lamun menghasilkan total 33 senyawa. *Enhalus acoroides* dan *Thalassia hemprichii* menunjukkan jumlah senyawa tertinggi di Pulau Mare, sedangkan *Cymodocea rotundata* relatif lebih stabil antar-lokasi. Temuan ini mengindikasikan bahwa habitat tektonik berpasir dengan kandungan nitrat tinggi dapat berkaitan dengan peningkatan keragaman metabolit sekunder sebagai respons pertahanan kimia dan adaptasi fisiologis. Senyawa seperti Haplophytine, Canthiumine, dan Zingerol perlu diposisikan sebagai *chemical signature* yang memerlukan verifikasi nomenklatur dan validasi identifikasi lebih lanjut.

Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi pendekatan biofisik, spasial, morfometrik, dan metabolomik untuk menjelaskan respons adaptif lamun pada morfotipe pulau kecil. Hasil penelitian memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan indikator kualitas habitat WP3K dan strategi pengelolaan lamun berbasis karakter morfotipe pulau, terutama dalam penentuan prioritas konservasi, rehabilitasi, dan monitoring ekosistem lamun di wilayah kepulauan tropis.

Kata kunci: adaptasi, ekosistem, habitat, oseanografi



SUMMARY

RUSTAM EFFENDI PAEMBONAN. Spatial Dynamics, Morphometric Characteristics, and Secondary Metabolite Profile of Seagrass in Response to the Morphotype Environment of Small Islands in North Maluku. Supervised by DIETRICH GEOFFREY BENGEN of 1st SUPERVISOR, I WAYAN NURJAYA of 2nd SUPERVISOR, SYAMSUL BAHRI AGUS of 3rd SUPERVISOR, and NYOMAN METTA N NATIH of 4th SUPERVISOR.

Seagrass ecosystems are tropical coastal ecosystems that play an important role as habitats for biota, sediment stabilizers, blue carbon sinks, nursery grounds, and supporters of fisheries productivity on small islands. The sustainability of this ecosystem is greatly influenced by habitat conditions, particularly hydro-oceanographic parameters, substrate quality, nutrient availability, and the geomorphological dynamics of the island. In archipelagic regions such as North Maluku, variations in island morphotypes (such as volcanic, tectonic, and lowland) have the potential to create distinct environmental characteristics and subsequently affect community structure, morphometric plasticity, and the metabolomic responses of seagrass.

This study aims to: (1) analyze the characteristics of seagrass habitat environmental parameters on different small island morphotypes; (2) analyze the spatial diversity of seagrass based on variation in environmental parameters; (3) analyze the morphometric characteristics of *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, and *Cymodocea rotundata* in response to habitat heterogeneity; (4) analyze the secondary metabolite profiles of seagrass that characterize adaptive responses in each small island morphotype; and (5) develop a conceptual synthesis regarding the adaptive responses of seagrass to the environment of small island morphotypes as a basis for developing habitat quality indicators and seagrass management strategies.

The research was conducted on three small islands in North Maluku representing different morphotypes: Ternate Island, a volcanic island; Mare Island, a tectonic island; and Tawabi Island, a lowland island. The parameters analyzed included physical-chemical oceanography, substrate quality, sediment fractions, spatial distribution of seagrass based on Sentinel-2A imagery and field data, seagrass community indices, above-ground and below-ground morphometric characteristics, and secondary metabolite profiles using LC-MS/MS. Multivariate analysis was used to identify environmental indicators, ecological associations, and seagrass response patterns among morphotypes.

The results of this study indicate that each island morphotype has distinct environmental characteristics. Ternate Island is characterized by water and substrate phosphate, wave height, seagrass distribution depth, and gravel fraction. Mare Island is characterized by sandy substrate dominance and high substrate nitrate content. Tawabi Island is characterized by temperature, salinity, TDS, turbidity, organic matter, substrate pH, and tidal characteristics that represent a shallow reef island environment. Cluster analysis shows that Mare Island and Tawabi Island have a closer environmental similarity compared to Ternate Island.

Spatial seagrass diversity exhibited distinct patterns between islands. Ternate Island was strongly associated with stand count, percent cover, dense shoot density, and dominance. Mare Island was closely associated with sparse density, higher species richness, diversity, and evenness. Tawabi Island is characterized by intermediate

density and community evenness. This pattern indicates that island morphotypes form a habitat mosaic that filters the seagrass community composition and structure.

The morphometric characteristics of *Enhalus acoroides*, *Thalassia hemprichii*, and *Cymodocea rotundata* demonstrate phenotypic plasticity as an adaptation to habitat heterogeneity. Variations in leaf length and width, sheath, internode, rhizome, and root indicate different adaptive strategies between above-ground and below-ground growth. These responses reflect the ability of seagrasses to maintain ecological function in habitats with different hydrodynamic dynamics, substrates, and nutrient levels.

The secondary metabolite profile showed that the three seagrass species produced 33 compounds. *Enhalus acoroides* and *Thalassia hemprichii* exhibited the highest number of compounds on Mare Island, while *Cymodocea rotundata* was relatively more stable across locations. These findings indicate that sandy tectonic habitats with high nitrate content may be associated with increased secondary metabolite diversity as a chemical defense response and physiological adaptation. Compounds such as Haplophytine, Canthiumine, and Zingerol should be positioned as chemical signatures requiring further nomenclature verification and identification validation.

The novelty of this study lies in the integration of biophysical, spatial, morphometric, and metabolomic approaches to elucidate the adaptive responses of seagrasses in small island morphotypes. The findings provide a scientific foundation for the development of WP3K habitat quality indicators and island morphotype-based seagrass management strategies, particularly for determining conservation, rehabilitation, and monitoring priorities for seagrass ecosystems in tropical archipelagic regions.

Keywords: adaptation, ecosystem, habitat, oceanography



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

**DINAMIKA SPASIAL, KARAKTERISTIK MORFOMETRIK,
DAN PROFIL METABOLIT SEKUNDER LAMUN SEBAGAI
RESPONS TERHADAP LINGKUNGAN MORFOTIPE PULAU-
PULAU KECIL DI MALUKU UTARA**

RUSTAM EFFENDI PAEMBONAN

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Kelautan

**PROGRAM DOKTOR ILMU KELAUTAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Ir. Joko Santoso, M.Si
- 2 Dr. Beginer Subhan, S.Pi., M.Si

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Riyadi Subur, S.Pi., M.Si
- 2 Prof. Dr. Ir. Joko Santoso, M.Si



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Judul Disertasi: Dinamika Spasial, Karakteristik Morfometrik, dan Profil
Metabolit Sekunder Lamun sebagai Respons terhadap
Lingkungan Morfotipe Pulau-Pulau Kecil di Maluku Utara

Nama : Rustam Effendi Paembonan
NIM : C5601221006

@Hak cipta milik IPB University

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof.Dr.Ir. Dietrieck Geoffrey Bengen, DEA

Pembimbing 2:
Dr. Ir. I Wayan Nurjaya, M.Sc

Pembimbing 3:
Dr. Syamsul Bahri Agus, S.Pi, M.Si

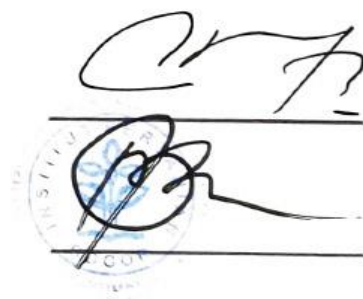
Pembimbing 4:
Dr. Ir. Nyoman Metta N Natih, M.Si



Diketahui oleh

Ketua Program Studi Ilmu Kelautan:
Prof. Dr. Ir. Neviaty Putri Zamani., M.Sc
NIP 196410141988032001

Dekan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan:
Dr. Beginer Subhan, S.Pi, M.Si
NIP 198001182005011003



Tanggal Ujian: 15 Juli 2026

Tanggal Lulus:



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi yang berjudul "Dinamika Spasial, Karakteristik Morfometrik, dan Profil Metabolit Sekunder Lamun sebagai Respons terhadap Lingkungan Morfotipe Pulau-Pulau Kecil di Maluku Utara." Disertasi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University..

Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Ir. Dietrich Geoffrey Bengen, DEA selaku Ketua Komisi Pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, motivasi, serta masukan ilmiah yang sangat berharga sejak penyusunan proposal, pelaksanaan penelitian, hingga penyelesaian disertasi ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Ir. I Wayan Nurjaya, M.Sc, Dr. Syamsul Bahri Agus, S.Pi, M.Si, dan Dr. Ir. Nyoman Metta N Natih, M.Si selaku Anggota Komisi Pembimbing atas segala saran, koreksi, perhatian, dan dukungan yang sangat berarti dalam penyempurnaan disertasi ini.

Penghargaan yang tulus penulis sampaikan kepada para penguji, yaitu Prof. Dr. Ir. Joko Santoso, M.Si dan Dr. Beginer Subhan, S.Pi., M.Si, atas berbagai kritik, saran, serta masukan yang konstruktif sehingga kualitas ilmiah disertasi ini menjadi lebih baik. Terimakasih juga kepada Dr. Riyadi Subur, S.Pi., M.Si sebagai penguji sidang promosi terbuka. Ucapan terimakasih kepada Prof. Dr. Ir. Neviaty Putri Zamani., M.Sc sebagai Ketua Program Studi Ilmu Kelautan yang telah membantu dalam penyelesaian dan penyempurnaan disertasi ini.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Rektor IPB University, Dekan Sekolah Pascasarjana, Dekan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Ketua Program Studi Ilmu Kelautan, seluruh dosen, tenaga kependidikan, laboran, dan staf administrasi yang telah memberikan pelayanan akademik serta dukungan selama penulis menempuh pendidikan doktor.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada Rektor Universitas Khairun, Dekan Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, dan staf yang telah memberikan bantuan dan dukungan penggunaan laboratorium, laboran, teknisi serta fasilitasnya selama penulis melaksanakan penelitian.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada BPI-LPDP sebagai pemberi beasiswa dan dukungan pendanaan penelitian. Terimakasih juga kepada orang-orang baik yang telah memberikan bantuan materil maupun non materil selama penulis menempuh studi.

Penulis juga berterimakasih kepada teman sejawat di Program Studi Ilmu Kelautan Universitas Khairun yang sekaligus membantu sampling data lapangan Firdaut Ismail, M.Si, Abdul A Siolimbona, M.Si, Ikbil Marus, M.Si, Dr. Nebuchad Nezzar, M.Si, Dr. Irmalita Tahir, M.Si dan Prof. Dr. Najamuddin, M.Si. Keluarga Pak Moldy di Pulau Mare dan Pak Indo di Pulau Tawabi yang telah memberikan banyak bantuan selama pengambilan data lapangan. Kepada Tim Lapangan: Fathur, Leli, Deang, dan anggota lainnya, penulis sangat berterimakasih atas bantuannya.

Terima kasih juga penulis sampaikan kepada teman-teman S3 IKL 2022, Insaniah Rahimah, Putri Mudlika, Tri Handayani, Camelia Tito, Zulham A Harahap, Rikoh M Siringoringo, M. Agung Nugraha, Agus Kusnadi, atas segala



- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

bantuan dan dukungannya selama perkuliahan dan penyusunan disertasi. Terimakasih juga kepada sahabat setia LSI, dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas kebersamaan, diskusi ilmiah, semangat, dan bantuan yang diberikan selama proses studi dan penyusunan disertasi ini.

Secara khusus, penulis mempersembahkan rasa hormat, cinta, dan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada kedua orang tua tercinta Ayahanda Rusli Kamma dan Ibunda Dahlia atas doa, kasih sayang, keteladanan, serta pengorbanan yang tidak pernah putus. Ucapan terima kasih yang setulus-tulusnya juga penulis sampaikan kepada istri tercinta Sartini, S.Pi beserta anak-anak Ahmad Ikram dan Muhammad Ihsan, saudaraku dr. Nur Asmar Salikunna, M.Sc dan Rusli Parman serta seluruh keluarga yang senantiasa memberikan doa, pengertian, kesabaran, motivasi, dan dukungan moril maupun materiil selama penulis menempuh pendidikan doktor.

Penulis menyadari bahwa disertasi ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, segala kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi penyempurnaan karya ilmiah ini. Semoga disertasi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang ekologi lamun, ekologi pesisir, dan pengelolaan sumber daya pesisir serta pulau-pulau kecil secara berkelanjutan.

Bogor, Agustus 2026

Rustam Effendi Paembonan



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan	9
1.4 Manfaat	9
1.5 Ruang Lingkup	10
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	10
1.7 Kerangka Pemikiran	11
II KARAKTERISTIK PARAMETER LINGKUNGAN EKOSISTEM LAMUN BERDASARKAN MORFOTIPE PULAU-PULAU KECIL DI MALUKU UTARA	13
2.1 Pendahuluan	13
2.2 Tujuan Penelitian	14
2.3 Metodologi	14
2.4 Hasil dan Pembahasan	17
2.5 Kesimpulan	38
III KERAGAMAN SPASIAL LAMUN BERDASARKAN VARIASI PARAMETER LINGKUNGAN PERAIRAN PADA BERBAGAI MORFOTIPE PULAU KECIL	39
3.1 Pendahuluan	39
3.2 Tujuan Penelitian	40
3.3 Metodologi	40
3.4 Hasil dan Pembahasan	45
3.5 Analisis distribusi spasial lamun berdasarkan morfotipe pulau	63
3.6 Kesimpulan	64
IV KARAKTERISTIK MORFOMETRIK LAMUN BERDASARKAN PARAMETER LINGKUNGAN MORFOTIPE PULAU-PULAU KECIL	65
4.1 Pendahuluan	65
4.2 Tujuan Penelitian	66
4.3 Metodologi	66
4.4 Hasil dan Pembahasan	68
4.5 Kesimpulan	83
V PEMETAAN PROFIL METABOLIT SEKUNDER DAN RESPON-ADAPTIF LAMUN BERDASARKAN MORFOTIPE PULAU-PULAU KECIL	84
5.1 Pendahuluan	84
5.2 Tujuan Penelitian	85
5.3 Metodologi	85
5.4 Hasil dan Pembahasan	87

5.5	Kesimpulan	120
VI	PEMBAHASAN UMUM	121
6.1	Keterkaitan Morfotipe Pulau dengan Profil Hidro-Oseanografi dan Substrat	121
6.2	Keterkaitan Morfotipe Pulau dengan Keragaman Spasial Lamun	123
6.3	Adaptasi Ekofisiologis Lamun: Sinergi Morfometrik dan Metabolomik	125
6.4	Sintesis konseptual respons adaptif lamun terhadap morfotipe pulau kecil untuk mendukung pengembangan indikator kualitas habitat dan strategi pengelolaan	127
VII	SIMPULAN DAN SARAN	129
7.1	Simpulan	129
7.2	Saran	129
	DAFTAR PUSTAKA	131
	LAMPIRAN	149
	RIWAYAT HIDUP	157

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR TABEL

1	Beberapa hasil review penelitian terdahulu yang berhubungan dengan <i>state of the art</i> penelitian lamun	1
2	Data parameter fisika oseanografi habitat lamun	18
3	Komponen pasang surut lokasi penelitian berdasarkan metode admiralty	20
4	Nilai rata-rata parameter kimia oseanografi habitat lamun	25
5	Nilai rata-rata parameter substrat habitat lamun	30
6	Nilai kumulatif fraksi sedimen habitat lamun	34
7	Koreksi citra Sentinel 2 yang digunakan dalam penelitian	45
8	Nilai konstanta K_i/K_j	46
9	Sebaran jenis lamun berdasarkan morfotipe pulau kecil	5
10	Indeks keanekaragaman lamun lokasi penelitian	61
11	Indeks keseragaman lamun lokasi penelitian	62
12	Indeks Dominansi lamun lokasi penelitian	62
13	Sampling data morfometrik berdasarkan jumlah individu setiap jenis lamun di lokasi penelitian	68
14	Parameter lingkungan habitat lamun di pulau-pulau kecil	76
15	Rendemen hasil ekstraksi jenis lamun	88
16	Kandungan jenis senyawa metabolit sekunder pada <i>Enhalus acoroides</i> di Pulau Ternate	91
17	Kandungan jenis senyawa metabolit sekunder pada <i>Enhalus acoroides</i> di Pulau Mare	93
18	Kandungan jenis senyawa metabolit sekunder pada <i>Enhalus acoroides</i> di Pulau Tawabi	94
19	Kandungan jenis senyawa metabolit sekunder pada <i>Thalassia hemprichii</i> di Pulau Ternate	96
20	Kandungan jenis senyawa metabolit sekunder pada <i>Thalassia hemprichii</i> di Pulau Mare	97
21	Kandungan jenis senyawa metabolit sekunder pada <i>Thalassia hemprichii</i> di Pulau Tawabi	99
22	Kandungan jenis senyawa metabolit sekunder pada <i>Cymodocea rotundata</i> di Pulau Ternate	101
23	Kandungan jenis senyawa metabolit sekunder pada <i>Cymodocea rotundata</i> di Pulau Mare	102
24	Kandungan jenis senyawa metabolit sekunder pada <i>Cymodocea rotundata</i> di Pulau Tawabi	103
25	Pola interseksi spasial senyawa metabolit sekunder <i>Enhalus acoroides</i> berdasarkan morfotipe pulau-pulau kecil	112
26	Pola interseksi spasial senyawa metabolit sekunder <i>Thalassia hemprichii</i> berdasarkan morfotipe pulau-pulau kecil	112
27	Pola interseksi spasial senyawa metabolit sekunder <i>Cymodocea rotundata</i> berdasarkan morfotipe pulau-pulau kecil	113
28	Pola interseksi spasial senyawa metabolit sekunder pada <i>Enhalus acoroides</i> , <i>Thalassia hemprichii</i> dan <i>Cymodocea rotundata</i>	113

DAFTAR GAMBAR

1	Rancangan Kerangka Pikir Penelitian	11
2	Peta lokasi penelitian	17
3	Grafik pasang surut bulanan	21
4	Karakteristik morfotipe pulau kecil berdasarkan asosiasi parameter lingkungan	35
5	Klaster kemiripan pulau berdasarkan parameter lingkungan	38
6	Sketsa pengambilan data komunitas lamun di lokasi penelitian.	43
7	Peta citra hasil transformasi DII di Pulau Ternate	47
8	Peta citra hasil transformasi DII di Pulau Mare	48
9	Peta citra hasil transformasi DII di Tawabi	49
10	Peta distribusi lamun di Pulau Ternate	50
11	Peta distribusi lamun di Pulau Mare	51
12	Peta distribusi lamun di Pulau Tawabi	52
13	Rata-rata jumlah tegakan jenis lamun (ind/m ²) di Pulau Ternate	55
14	Rata-rata persentase tutupan jenis lamun di Pulau Ternate	56
15	Rata-rata jumlah tegakan jenis lamun (ind/m ²) di Pulau Mare	57
16	Rata-rata persentase tutupan jenis lamun di Pulau Mare	58
17	Rata-rata jumlah tegakan jenis lamun (ind/m ²) di Pulau Tawabi	59
18	Rata-rata persentase tutupan jenis lamun di Pulau Tawabi	60
19	Analisis asosiasi distribusi lamun	64
20	Pengambilan sampel individu morfometrik jenis lamun	67
21	Sketsa morfometrik lamun	67
22	Ukuran morfometrik <i>Enhalus acoroides</i>	71
23	Ukuran morfometrik <i>Thalassia hemprichii</i>	73
24	Ukuran morfometrik <i>Cymodocea rotundata</i>	75
25	Grafik analisis PCA terhadap karakteristik morfometrik <i>Enhalus acoroides</i>	79
26	Grafik analisis PCA terhadap karakteristik morfometrik <i>Thalassia hemprichii</i>	80
27	Grafik analisis PCA terhadap karakteristik morfometrik <i>Cymodocea rotundata</i>	81
28	Komposisi kandungan jumlah senyawa metabolit sekunder lamun	89
29	Hasil analisis kandungan senyawa pada lamun <i>Enhalus acoroides</i> di pulau kecil menggunakan LCMS/MS	90
30	Hasil analisis kandungan senyawa pada lamun <i>Thalassia hemprichii</i> di pulau kecil menggunakan LCMS/MS	95
31	Hasil analisis kandungan senyawa pada lamun <i>Cymodocea rotundata</i> di pulau kecil menggunakan LCMS/MS	100
32	Kuantitatif senyawa metabolit sekunder <i>Enhalus acoroides</i> ; (a) Pulau Ternate, (b) Pulau Mare, (c) Pulau Tawabi	108
33	Kuantitatif senyawa metabolit sekunder <i>Thalassia hemprichii</i> ; (a) Pulau Ternate, (b) Pulau Mare, (c) Pulau Tawabi	108
34	Kuantitatif senyawa metabolit sekunder <i>Cymodocea rotundata</i> ; (a) Pulau Ternate, (b) Pulau Mare, (c) Pulau Tawabi	109
35	Penyebaran spasial metabolit sekunder jenis lamun	110



36	Analisis PCA sebaran kandungan metabolit sekunder <i>Enhalus acoroides</i> berdasarkan kuantitatif	114
37	Analisis PCA sebaran kandungan metabolit sekunder <i>Thalassia hemprichii</i> berdasarkan kuantitatif	115
38	Analisis PCA sebaran kandungan metabolit sekunder <i>Cymodocea rotundata</i> berdasarkan kuantitatif	116
39	Komposisi metabolit sekunder lamun berdasarkan asosiasi yang mencirikan morfotipe pulau-pulau kecil	117
40	Komposisi respon-adaptasi metabolite sekunder lamun	119

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



DAFTAR LAMPIRAN

1	Matriks integrasi antar tujuan penelitian	150
2	Karakteristik morfometrik jenis lamun berdasarkan morfotipe pulau-pulau kecil	151
3	Daftar senyawa metabolit sekunder lamun berdasarkan respon-adaptif	155

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.